اثر اصلاح سطح الیاف شیشه بر خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی*

شیرین پورحسینی[1] سمانه صاحبیان سقی[2] احد ضابط[3]

چکیده

یکی از مباحث کلّیدی در فراوری مواد کامپوزیتی پلیمری توزیع‌پذیری مطلوب فاز ثانویه و ایجاد فصل مشترکی چسبنده است. در این پژوهش روش‌های متفاوت اصلاح سطح الیاف شیشه بر خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از اپوکسی EP 2040/2047 و الیاف شیشه از نوع E و آمینو سیلان به‌منظور عامل‌دار نمودن سطح الیاف شیشه استفاده شد. فرآیند اسید شویی (HCl%10) الیاف قبل از اعمال سیلان به‌منظور آماده سازی سطح الیاف انجام شد. ارزیابی سطح الیاف اصلاح شده با کمک آزمون طیف سنجی مادون‌قرمز (FTIR) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کامپوزیتی با روش نفوذ رزین به کمک خلأ (VIP) ساخته شده و مورد آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه قرار گرفتند. نتایج آزمون نشان‌دهنده بهبود 18 در صدی استحکام چسبندگی فصل مشترک در حضور سیلان و عدم افزایش قابل‌ملاحظه استحکام چسبندگی با فرآیند اسید شویی است که با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) فرآیند اسیدشویی منجر به آسیب‌دیدگی سطحی الیاف شده است.

واژه‌های کلّیدی کامپوزیت، اپوکسی، الیاف شیشه، سیلان، آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه.

Effect of Surface Treatment of Glass Fiber on Mechanical Properties of Epoxy Composite

Sh. Pourhosseini S. Sahebian A. Zabett

Abstract

The key issue in the processing composite material is to create an appropriate distribution of the secondary phase and make an adhesive interface. In this research, the effect of surface treatment of glass fibers on the mechanical behavior of composites with epoxy matrix has been investigated. EP 2040/2047 epoxy as the matrix and E-glass as the secondary phase has been employed. Similarly, an amino silane as a coupling agent has been used. To change the composition of the glass and regenerate to the hydroxyl groups, activation pretreatment of glass fibers was performed using a 10% (v/v) hydrochloric acid. Surface modification evaluated by using Fourier Transform Infrared spectroscopy. Composite samples were constructed by Vacuum Infusion Process method and short beam shear test has been conducted to determine the performance of the acid treatment and the silane treatment in terms of the interlaminar shear strength. The silane coating glass fibers increased 18% the shear strength of the composite. However, the silane coating on the acid activated glass fibers did not improve the shear strength of the composite.

Keywords Composite, Epoxy, Glass fiber, Silane, Short beam shear test.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ 96/1/20 و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ 96/10/9 به دفتر نشریه رسیده است.

(1) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(2) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(3) دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: S.Sahebian@um.ac.ir

DOI:10.22067/ma.v31i1.63331

مقدمه

امروزه کامپوزیت زمینه پلیمری به علّت دارا بودن خواص مکانیکی، فیزیکی و مقاومت شیمیایی بسیار عالی در مقایسه با هر یک از اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن مورد توجّه قرار گرفته است. ازآن‌جایی‌که مواد پلیمری به‌تنهایی خواص مکانیکی مطلوبی ندارند، از فاز تقویت‌کنندهٔ الیافی شکل به‌صورت معمول در زمینه‌های پلیمری استفاده می‌شود که دارای خواص مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به فاز زمینه است. وزن کم، پایداری عالی در شرایط محیطی مختلف، استحکام و سفتی بالا در شرایط بارگذاری بحرانی از مشخصات این دسته از مواد است که در بسیاری از صنایع مانند هوافضا، اتومبیل‌سازی و انرژی بادی مورد توجّه صنعتگران و محقّقین قرار گرفته است [1,2]. ازجمله پرکاربردترین زمینه‌های مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌های زمینه، پلیمری رزین‌های اپوکسی هستند که به علّت چسبندگی مناسب، مقاومت مطلوب در برابر عوامل شیمیایی، ویسکوزیته‌ی پایین به‌صورت گسترده در ساخت کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته می‌شود. از انواع رایج تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در رزین‌های اپوکسی می‌توان به الیاف شیشه، کولار و کربن اشاره نمود. در این میان، الیاف شیشه با توجّه به عملکرد مطلوب نسبت به هزینه‌ی تمام‌شده، رایج‌ترین و پرمصرف‌ترین نوع الیاف در صنعت کامپوزیت سازی است [3,4].

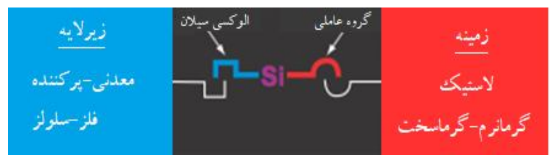
خواص مکانیکی کامپوزیت به خواص زمینه، الیاف، مورفولوژی سطح الیاف و ماهیّت پیوندهای فصل مشترک بین الیاف و زمینه وابسته است. فصل مشترک به‌عنوان محلی که انتقال بار از زمینه به الیاف صورت می‌گیرد، وابستگی شدیدی به میزان پیوند شیمیایی، ضخامت و استحکام فاز میانی موجود در فصل مشترک دارد. به همین منظور، مطالعات زیادی در زمینهٔ ایجاد فصل مشترک چسبنده در کامپوزیت انجام‌شده است تا استحکام، چقرمگی و پایداری محیطی آن بهبود یابد [5,6]. یکی از روش‌های مؤثر جهت کنترل خواص فصل مشترک، اصلاح سطح الیاف برای ایجاد پیوند بهینه در فصل مشترک است. عوامل اصلاح‌کنندهٔ زیادی مانند عامل کوپلینگ، آهار و فیلم‌سازها جهت اصلاح سطح الیاف شیشه وجود دارد که چسبندگی بین الیاف و زمینه را بهبود می‌بخشد. در این میان، سیلان‌ها از نوع عوامل کوپلینگ با فرآیند شیمی تر به الیاف‌ها اضافه می‌شوند و منجر به چسبندگی مطلوب میان الیاف و زمینه می‌شوند. سیلان‌ها به علّت دارا بودن دو سر فعّال قابلیّت واکنش‌پذیری با زمینهٔ پلیمری ارگانیک و الیاف شیشه غیر ارگانیک را دارند. سیلان‌ها ترکیباتی با ساختار کلّی $Y\text{-}Si\text{-}OX_3$ می‌باشند که در آن Y گروه عاملی جهت برقراری پیوند با زمینه بوده و X گروه آلکیلی قابل هیدرولیز جهت برقراری پیوند با سطح الیاف است (شکل 1) [5,7]. پارک و جین [8] اثر اصلاح سطح الیاف شیشه با درصدهای مختلف سیلان را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها ترکیب 90% متااکریلوکسی پروپیل تری متوکسی سیلان و 10% آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان را برای الیاف شیشه انتخاب کردند. طبق نتایج حضور سیلان در فصل مشترک کامپوزیت منجر به بهبود استحکام چسبندگی فصل مشترک کامپوزیت (ILSS) شده است که به علّت تشکیل پیوندهای شیمیایی در فصل مشترک است امّا با افزایش درصد سیلان لایه‌های تشکیل شده بر روی زیرلایه افزایش‌یافته و خواص مکانیکی کامپوزیت کاهش می‌یابد.

در این میان، اثر فرآیند آماده سازی سطح الیاف شیشه قبل از اعمال سیلان بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت کمتر مورد توجّه قرار گرفته است. فرآیند اسید شویی الیاف شیشه قبل از اعمال سیلان منجر به تغییر ترکیب سطحی الیاف شده و میزان گروه‌های OH– را بر روی سطح افزایش می‌دهد. گروه‌های هیدرولیز شده در سیلان Si-OH تمایل دارند با Si-OH های موجود بر روی سطح الیاف شیشه وارد واکنش شده و تشکیل پیوند Si-O-Si دهند. آماده‌سازی سطح الیاف شیشه با فرآیند اسیدشویی امکان تشکیل گروه های سیلانول بیشتری را بر روی سطح الیاف فراهم می‌کند (شکل 2) [5,9].

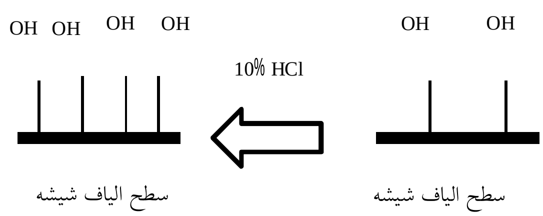
گونزالز و همکاران [10] اثر آماده‌سازی‌های متفاوتی را بر روی الیاف شیشه قبل از اعمال آمینوسیلان را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که میزان

سیلان پذیری در حالت الیاف‌های اسید شویی بسیار بیشتر از الیاف در معرض آب قرار گرفته شده است.

رویکرد اصلی در تحقیق حاضر بررسی اثر اصلاح سطح متفاوت بر روی سطح الیاف شیشه و بر هم کنش بهینه بین سیلان و الیاف و تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی است. بررسی انجام فرآیند اصلاح سطح با آنالیز طیف‌سنجی FTIR صورت گرفت. در ادامه آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه ILSS به‌منظور بررسی استحکام چسبندگی فصل مشترک انجام شد. بررسی سطح الیاف نیز به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (1) نقش سیلان در فصل مشترک [5]



شکل (2) نقش اسیدشویی بر روی سطح الیاف شیشه [5]

مواد و روش تحقیق

مواد. در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی با نام تجاری 2040 Epolem و هاردنر پلی آمینی با نام Epolem 2047 ساخت شرکت آکسون فرانسه، به‌عنوان ماده‌ی زمینه مورد استفاده قرار گرفتند. پایین بودن ویسکوزیته و بالا بودن زمان ژل شدن، علّت انتخاب این نوع رزین است. درصد اختلاط این نوع رزین و هاردنر 100/32 است. فاز تقویت‌کنندهٔ مورد استفاده در ساخت کامپوزیت، الیاف شیشهٔ نوع E، یک جهته با دانسیتهٔ حجمی 2/58 g/cm^3 بود که از شرکت STA ترکیه تهیه شد. بیش از 90% از الیاف شیشه مورد استفاده در صنعت کامپوزیت، به علّت خواص و قیمت مناسب از نوع E است. در این تحقیق به‌منظور مطالعه فصل مشترک کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه در ساخت پره‌های توربین بادی، از الیاف شیشه مرسوم در ساخت این دسته از مواد استفاده گردید. به‌منظور ایجاد سازگاری و بر هم کنش بهتر الیاف شیشه با زمینه‌ی اپوکسی از عامل کوپلینگ ارگانوسیلان گاما-آمینوپروپیل تری اتوکسی(γ-APTES) محصول شرکت آلدریچ سیگما با خلوص ٪98 استفاده شد. هم‌چنین اسید هیدروکلریک (HCl 37%) جهت اسیدشویی مورد استفاده قرار گرفت.

اصلاح سطح الیاف شیشه. آماده‌سازی الیاف شیشه در سه حالت، الیاف شیشه با آهار تجاری، الیاف شیشه بدون آهار و الیاف شیشه اسیدشویی شده صورت گرفت. به‌منظور حذف آهار، الیاف شیشه در دمای 500 درجه سانتی‌گراد به مدّت 1 ساعت حرارت داده شد. این دما با توجّه به رفتار حرارتی الیاف شیشه در نمودار وزن سنجی حرارتی TGA انتخاب شد (شکل 3). با توجّه به نمودار TGA مشاهده می‌شود که در دماهای بالاتر از 500 درجه سانتی‌گراد، ماده به پایداری رسیده و حذف آهار به‌طور کامل صورت گرفته است.

به‌منظور آماده سازی سطح الیاف و تشکیل گروه‌های OH روی سطح، پیش از اعمال سیلان، فرآیند اسید شویی الیاف در محلولی شامل (v/v) 10% اسید هیدروکلریک، به مدّت 3 ساعت در دمای محیط انجام شد. شستشوی نمونه‌ها با آب مقطر تا رسیدن به pH خنثی و حذف کلریدهای آزاد صورت گرفت. عدم حضور کلرید توسط $AgNO_3$ تشخیص داده شد. در نهایت نمونه‌ها به مدّت 1 ساعت در دمای 110 درجه سانتی‌گراد خشک شدند.

به‌منظور اعمال سیلان بر روی نمونه‌ها، محلولی شامل (v/v) 0/5% APTES به همراه 95%wt اتانول و 5%wt آب مقطر آماده شد. پس‌ازاینکه عامل کوپلینگ به‌وسیلهٔ اسید استیک در pH=4 به مدّت 1 ساعت هیدرولیز شد، نمونه‌ها به مدّت 30 دقیقه در محلول غوطه‌ور بوده و در نهایت در دمای 110 درجه سانتی‌گراد به مدّت 1 ساعت خشک شدند.

ساخت کامپوزیت. ساخت نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی با روش نفوذ رزین به کمک خلأ (VIP) در 4 سری به ابعاد (10×15 سانتی‌متر) صورت گرفت. در این فرآیند، لایه‌های الیاف شیشه درون پارچه‌ی داکرون قرار داده شد. برای جریان بهتر رزین، پارچه‌ی مشبکی بر روی پارچه-ی داکرون قرار گرفت. در ادامه روکش پلاستیکی روی نمونه‌ها گذاشته و فرآیند خلأ اعمال شد. بعد از اختلاط رزین و هاردنر عملیات گاززدایی توسط دستگاه مکش صورت گرفته و عملیات تزریق آغاز شد. فرآیند پخت به مدّت 2 ساعت در دمای 40 درجه سانتی‌گراد و 16 ساعت در دمای 70 درجه سانتی‌گراد انجام شد. مشخصات کامپوزیت در جدول (1) آمده است.

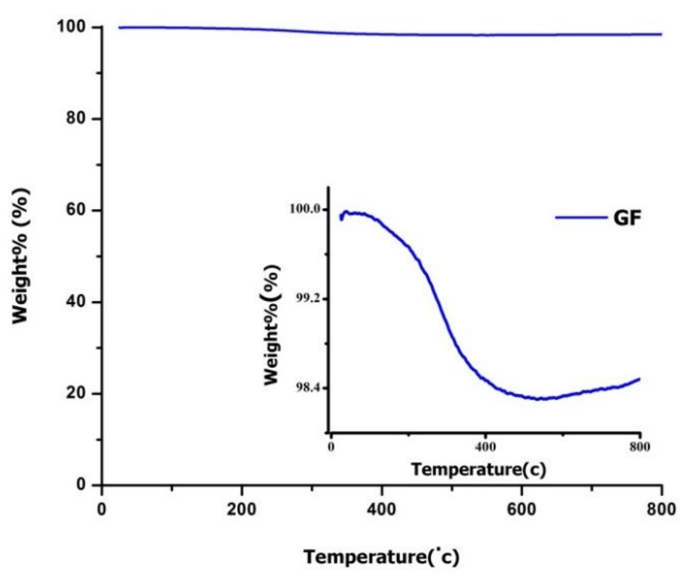
تجهیزات. به‌منظور بررسی استحکام چسبندگی فصل مشترک نمونه‌ها، آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه (ILSS) در 4 سری Co-UGF ،Co-GF ،Co-GFTS ،Co-AATS (جدول 1) با استفاده از دستگاه Zwick Z250 انجام شد. نمونه‌های آزمون بر اساس استانداردهای ASTM D2344 در 7 لایه به ابعاد 40mm×15 mm تهیه شدند. سرعت انجام آزمون 1mm/min و فاصلۀ بین دو تکیه‌گاه 20 mm با بار اعمالی 2 KN در نظر گرفته شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمون ILSS برای هر نمونه در سه مرتبه انجام گرفت. میزان ILSS ، برای نمونه‌های کامپوزیتی با سطح مقطع مستطیل طبق رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{ILSS} = 0.75\frac{F}{b\times h} \qquad (1)$$

که در این فرمول F بیشترین نیرو، قبل از شکست نمونه، b پهنای نمونه، h ضخامت نمونه و ILSS استحکام نمونه است.

آزمون (FTIR) با دستگاه Thermo Nicolet برای تمام نمونه‌ها انجام شد. 10 میلی‌گرم از نمونه‌ها، در 100 میلی‌گرم پودر پتاسیم بروميد KBr رقیق شد. هر نمودار در بازۀ cm^{-1} 400- 4000 با رزولوشن $4\ \mathrm{cm}^{-1}$ اندازه‌گیری شد.

به‌منظور ارزیابی میکرو سکوپی سطح خارجی الیاف‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی با ولتاژ 5kV استفاده شد.



شکل (3) منحنی وزن سنجی حرارتی نمونه GF

جدول (1) مشخصات و کد کامپوزیت‌های ساخته‌شده

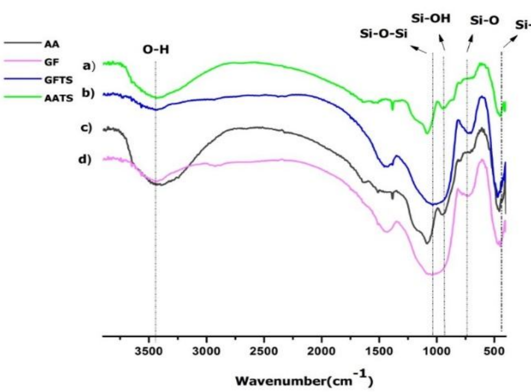
کد نمونه الیاف	عملیات اسیدشویی	عملیات سیلان دار کردن	کد نمونه کامپوزیت
UGF	-	-	Co-UGF
GF	-	-	Co-GF
AA	HCl %10	-	-
GFTS	-	0/5 درصد APTES	Co-GFTS
AATS	HCl %10	0/5 درصد APTES	Co-AATS

نتایج و بحث

آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز. نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی مادون‌قرمز (FTIR) برای نمونه‌های GFTS،AA،GF و AATS در نمودار شکل (4) آورده شده است. اثر اسیدشویی بر روی الیاف شیشه و اثر اعمال آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان در نمودار قابل مشاهده است. پیک جذب مشاهده شده در بازه‌ی $3350\text{-}3450\ cm^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (OH-) موجود روی سطح الیاف شیشه است. پیک جذبی iS-O-Si سه مشخصه در طیف‌سنجی مادون‌قرمز شامل ارتعاش غیرمتقارن در نواحی $1100\text{-}1000cm^{-1}$، ارتعاش متقارن در نواحی $800cm^{-1}$ و ارتعاش خمشی یا راکینگ در نواحی $450cm^{-1}$ از خود نشان می‌دهد (شکل 4) [11].

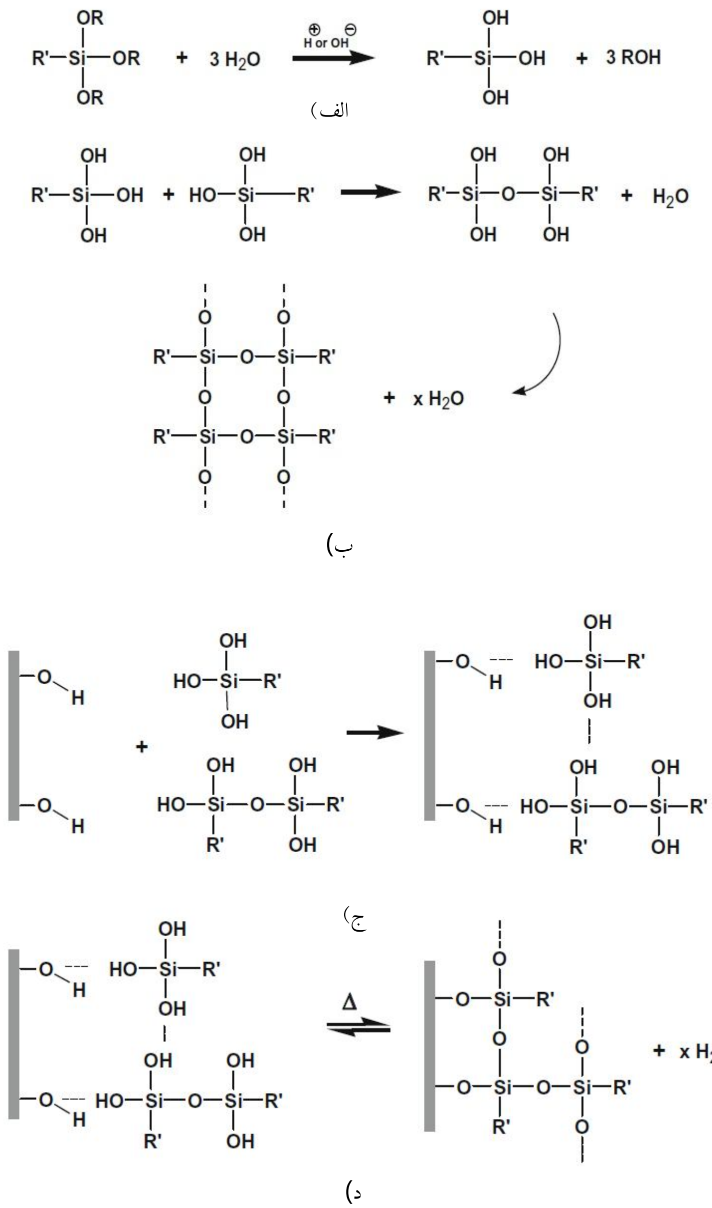
با توجّه به نمودار های FG و GFTS در عملیات سیلان‌دار کردن الیاف، جابجایی از پیک $1042/02\ cm^{-1}$ به پیک $1033/66\ cm^{-1}$ و عملیات اسید شویی باعث انتقال این پیک به $1080/84\ cm^{-1}$ شده است. با مقایسه دو نمودار d ،b و دو نمودار a، c باهم می‌توان گفت شدت پیک OH که در محدوده $3350\text{-}3450\ cm^{-1}$ قرار دارد بعد از فرآیند سیلان دار کردن کاهش یافته که به علّت مصرف گروه های هیدروکسیل در واکنش تراکمی سطح الیاف است.

فرایند اسیدشویی با اسید هیدروکلریک کاتیون‌های ساختار الیاف شیشه نوع E را از سطح خارج کرده و ساختار سطح الیاف را تغییر می‌دهد. به همین جهت با مقایسه نمونه‌های GF و AA تغییر شکل پیک در بازه‌ی 1600-1300 مشاهده می‌شود. در نمونه‌های AATS و GFTS با اعمال سیلان الگوی پیک ها در بازه‌ی 1600-1300 در مقایسه با نمونه‌های AA وGF تغییر نکرده که نشان می‌دهد در واکنش میان سیلان و الیاف شرکت نداشته‌اند.



شکل (4): منحنی FTIR نمونه‌های GFTS،GF،AA و AATS

مراحل کلّی واکنش بین سطح الیاف شیشه و سیلان APTES در شکل (5) نشان داده شده است. به‌طورکلّی واکنش مذکور شامل مراحلی متشکل از هیدرولیز عامل سیلان و در ادامه واکنش تراکمی میان گروه‌های هیدروکسیل سطح الیاف شیشه و گروه سیلانول در سیلان صورت گرفته و در نهایت منجر به ایجاد پیوند کووالانت می‌شود.



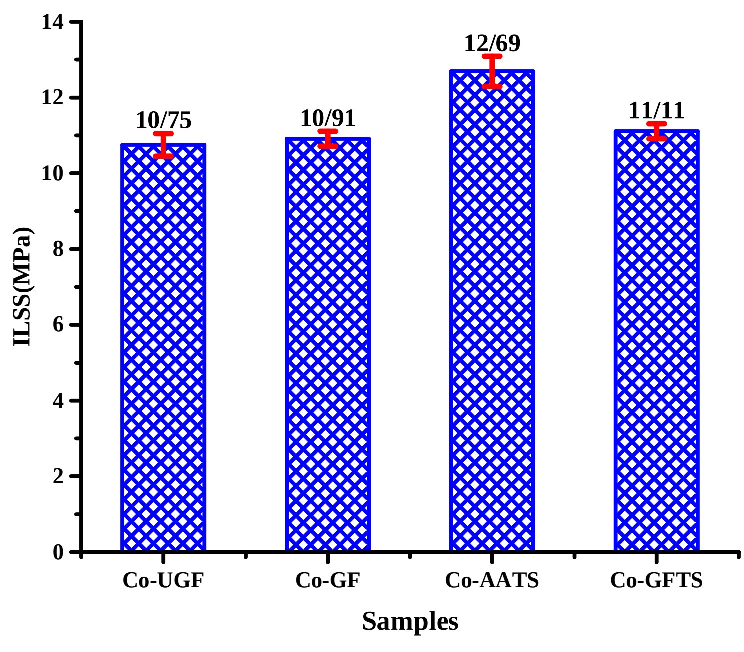
شکل (5) واکنش انجام‌شده در فصل مشترک سیلان و الیاف شیشه [5]

آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه. نتایج ILSS در شکل (6) رابطهٔ میان اصلاح سطح انجام‌شده بر روی الیاف شیشه و میزان چسبندگی فصل مشترک کامپوزیت آمده است. در آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه، نیروی برشی اعمال‌شده به نمونه می‌تواند معیار مناسبی جهت بررسی پیوندهای فصل مشترک زمینه و فاز تقویت‌کننده باشد. با استفاده از رابطه (1) مقدار ILSS برای نمونه‌های کامپوزیتی در جدول (2) محاسبه گردید. با توجّه به نتایج نمونه کامپوزیتی Co-UGF کمترین مقدار ILSS را دارا است. با مقایسه نمونه‌های Co-UGF و Co-GF تفاوت چشم‌گیری در میزان ILSS مشاهده نمی‌شود که این مطلب نشان‌دهندهٔ آن است که حضور آهار تجاری پیوند مطلوبی با زمینه پلیمری برقرار

نکرده اســـت. اگرچه حضـــور آهار نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه ایفا می‌کند و از تجمع رطوبت در فصل مشترک جلوگیری می‌کند، امّا با توجّه به نتایج به‌دســـت‌آمده در ایجاد چســـبندگی و پیوند مطلوب در فصـــل مشـــترک فاز زمینه و الیاف شـــیشـــه موفق عمل نکرده است. در نمونه Co-GFTS مشاهده می شود که وجود سیلان منجر به بهبود 18 درصدی ILSS شده است. این بهبود به علّت افزایش چســـبندگی فصـــل مشـــترک کامپوزیت و افزایش چســـبندگی به علّت اعمال ســـیلان و اصـــلاح ســـطح الیاف اســـت. در نمونه Co-AATS عملیات اسید شویی به‌منظور مهیا شدن سطح الیاف جهت واکنش پذیری بهتر ســـیلان با الیاف انجام شـــد. با توجّه به نتایج، بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در این نمونه مشاهده نمی شود. کیم و مای [12] نیز گزارش نموده‌اند که بر اثر اصلاح سطح مازاد امکان کاهش چســـبندگی فصـــل مشـــترک، کاهش اســـتحکام پیوندی و تخریب ساختاری الیاف اتفاق می‌افتد. جونز و بتز [13] نیز نشـــان دادند که الیاف‌های شـــیشـــه قرار گرفته در حلال اسیدی سبب کاهش استحکام الیاف و تنزل ساختار شـــیمیایی الیاف می‌شـــود. به همین جهت به نظر می‌رســـد تخریب ساختار الیاف شیشه در مرحلۀ اسید شویی قبل از اعمال سیلان، علّت عدم بهبود چسبندگی در فصل مشترک در نظر گرفته شده است.

جدول (2): نتایج آزمون استحکام برشی نمونه کوتاه

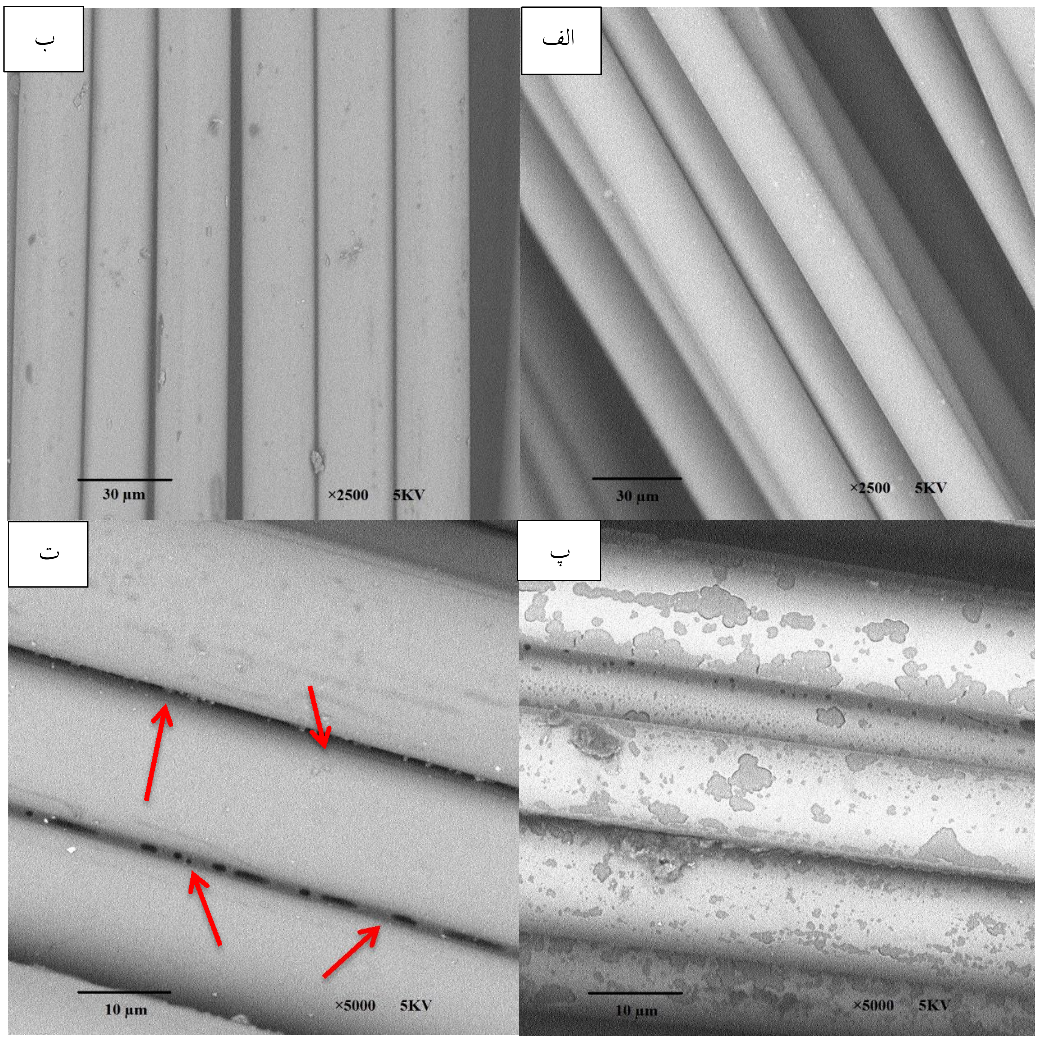
کد نمونه	ضخامت(mm)	پهنا(mm)	نیرو نهایی(N)	(MPa)ILSS
UGF-Co	1/8	12/34	318/58	10/75±0/32
GF-Co	1/95	12/31	350/06	10/91±0/22
GFTS-Co	2/25	12/49	475/11	12/69±0/42
AATS-Co	2/02	12/74	379/49	11/11±0/24



شکل (6) ILSS کامپوزیت‌های اپوکسی/ الیاف شیشه با اصلاح سطح متفاوت الیاف

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی. شکل (7-الف – ت) تصاویر SEM نمونه‌های UGF، GF، GFTS و AATS آورده شده است. در شکل (7-الف) آهار تجاری به‌صورت پوشش لایه‌ای و جزیره‌های کوچک بر روی سطح الیاف به‌خوبی قابل رؤیت است. تحقیقات استرمن و بردلی [14] نشان داد که روش تجاری اعمال سایزینگ بر روی الیاف، منجر به ایجاد پوشش ضخیم و غیریکنواخت بر روی الیاف می‌گردد که به‌صورت ذرات پراکنده و آگلومره شده در سطح الیاف قابل رؤیت است با حرارت دیدن الیاف در دمای 500 درجه سانتی‌گراد لایهٔ آهار از سطح الیاف کاملاً حذف شده است (شکل 7-ب).

در شکل (7- پ و ت) اعمال سیلان بر روی الیاف شیشه انجام‌شده است که به‌صورت لایه‌ای چسبنده بر روی الیاف مشاهده می‌شود. هم‌چنین در شکل (7-پ) آسیب‌دیدگی سطح الیاف در اثر عملیات اسید شویی کاملاً قابل رؤیت است. ترکیبات اولیه الیاف شیشه بر میزان خوردگی الیاف بسیار مؤثر است، هم‌چنین جهت انتخاب شرایط بهینه به‌منظور جلوگیری از تخریب سطحی الیاف افزایش میزان SiO_2 و پیوند هیدروکسیل سطحی بسیار کلّیدی است.



شکل (7) تصاویر SEM نمونه‌های الف)UGF ب) GF پ) AATS ت)GFTS

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی اثر اصلاح سطح الیاف شیشه در طی فرآیند شیمی تر بر استحکام چسبندگی فصل مشترک کامپوزیت زمینه اپوکسی صورت گرفت. اصلاح سطح با کمک عامل کوپلینگ آمینو پروپیل اتوکسی سیلان موجب افزایش 18 درصدی ILSS شد که نشان‌دهندهٔ بهبود چسبندگی فصل مشترک است. در این میان، با انجام عملیات آماده‌سازی سطح الیاف شیشه با اسیدشویی 10% HCl بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در چسبندگی فصل مشترک ایجاد نشد که با توجّه به تصاویر SEM احتمالاً آسیب‌دیدگی سطحی الیاف علّت این موضوع است.

مراجع

1. Leonard, L., Wong, K., Low, K., Yousif, B., "Fracture behaviour of glass fibre-reinforced polyester composite". *P. I. Mech. Eng. L-J. Mat*., Vol. 223, No.2, pp.83-89, (2009).
2. Faizal, M.A., Beng, Y.K., Dalimin, M. N., "Tensile property of hand lay-up plain-weave woven e-glass/polyester composite: Curing pressure and Ply arrangement effect". *Born. Sci*., Vol. 19, pp. 27-34, (2006).
3. Wang, X. Song, L. Pornwannchai, W. Hu, Y. and Kandola, B., "The Effect of Graphene Presence in Flame Retarded Epoxy Resin Matrix on the Mechanical and Flammability Properties of Glass Fiber-Reinforced Composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*, Vol. 53, pp.88-96, (2013).
4. Park, J.M., Wang, Z.J., Jang, J.H., Gnidakoung, J .R. N., Lee, W.I., Park, J.K., Lawrence DeVries, K., "Interfacial and hydrophobic evaluation of glass fiber/CNT–epoxy nanocomposites using electro-micromechanical technique and wettability test". *Composites Part A.*, Vol. 40, No.11, pp. 1722-1731, (2009).
5. Zeyu Liu, Letao Zhang, Erlei Yu., "Modification of Glass Fiber Surface and Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Challenges and Opportunities: From Organic Chemistry Perspectiv", *Current Organic Chemistry.*, Vol.19, pp. 991-1010, (2015).
6. F.M. Zhao, N. Takeda., "Effect of interfacial adhesion and statistical fiber strength on tensile strength of unidirectional glass fiber/epoxy composites", *Composites: Part A.*, Vol. 31, pp. 1203–1214, (2000).
7. Edwin P. Plueddemann., "Silne Coup-ling Agents", Plenum Press, New York in (1982).
8. Soo-Jin Park and Joong-Seong Jin., "Effect of Silane Coupling Agent on Interphase and Performance of Glass Fibers/Unsaturated Polyester Composites", *Journal of Colloid and Interface Science., Vol.242*, pp.174–179, (2001).
9. Olmos D, Lopez-Moron R, Gonza´lez-Benito J., "The nature of the glass fibre surface and its effect in the water absorption of glass fibre/epoxy composites. The use of fluorescence to obtain information at the interface", *Compos Sci Technol.*, Vol. 66, No.15, pp. 2758-2768, (2006).
10. Gonza´lez-Benito J, Baselga J, Aznar AJ., "Microstructural and wettability study of surface pretreated glass fibres", *J Mater Process Technol., Vol. 93, pp 129-134*, (1999).
11. Min Tae Kim. "Deposition behavior of hexamethydisiloxane films based on the FTIR analysis of Si–O–Si and Si–CH3 bonds". *Thin Solid Films.*, Vol. 311, pp. 157–163, (1997).

12. Kim. J.K, Mai. Y.W., "Engineered interfaces in fiber reinforced composites". Elsevier, UK, (1998).
13. Jones. R.L., Betz. D., "The kinetics of corrosion of E-glass fibres in hydrochloric acid", *J. Mater Sci.*, Vol. 39, No. 18, pp 5633-5637, (2004).
14. Sterman, S. and H. Bradley., "A new interpretation of the glass□coupling agent surface through use of electron microscopy". *Polymer Engineering & Science*., Vol. 1, No.4, pp. 224-233, (1961).